

Untersuchungen zu Ph. BROEMSERS Abstimmungstheorie

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

←

vorgelegt
von
Heidrun Päuser
aus
Schönebeck

1969

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Dekan: Prof.Dr. A.Kröncke

Referent: Priv.Doiz.Dr. Th.Kenner

Korreferent: Prof.Dr. E.Wetterer

Tag der mündl. Prüfung: 20.2.1969

Herrn Prof. Dr. E. Kretschmer, Direktor des k. k. kaiserlichen
allgemeinen Instituts für Wissenschaften, Berlin-Charlottenburg,
denke ich für die freundliche Berücksichtigung im Voraus.

Meinen Eltern und meinem Großvater in Dankbarkeit
gewidmet

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr. E. Kretschmer
für seine freundliche Anregung und seine Hilfe sowie
Betreuung bei der Ausarbeitung der Arbeit.
Der Arbeit.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546207_0061

Herrn Prof.Dr. E.Wetterer, Direktor des II. Physiologischen Instituts der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die freundliche Überlassung des Themas.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Priv.Doiz.Dr. Th.Kenner für seine zahlreichen Anregungen und seine hilfsbereite Unterstützung bei der Durchführung und Abfassung der Arbeit.





Aus dem II. Physiologischen Institut der Universität Erlangen-Nürnberg
(Direktor: Prof. Dr. E. Wetterer)

Untersuchungen zu Ph. BROEMERS Abstimmungstheorie

Von H. P ä u s e r und Th. K e n n e r

Mit 8 Abbildungen

(Eingegangen am 14. März 1968)

Broemser (1935) hat als erster die Annahme ausgesprochen, daß normalerweise zwischen Herz und Arteriensystem eine optimale Abstimmung bestehe. In Modellversuchen fanden er und seine Mitarbeiter Roth (1935) und Siedek (1935), daß bei der von ihnen verwendeten Versuchsanordnung das Schlagvolumen der Herzpumpe vom Verhältnis der Systolendauer zur Grundschwingungsdauer abhängt und bei bestimmten Werten dieses Verhältnisses ein Maximum bzw. ein Minimum hat. Eine optimale Abstimmung zwischen dem Ablauf der Herzaktion und den Eigenschaften des Arteriensystems im Sinne Broemser besteht demnach darin, daß mit einer möglichst geringen Herzleistung ein möglichst großes Schlagvolumen gefördert wird.

Voraussetzung für die Möglichkeit einer derartigen Abstimmung ist die Frequenzabhängigkeit gewisser Eigenschaften des Arteriensystems, die in bezug auf die Pumpaktion des Herzens im sogenannten Eingangswiderstand zum Ausdruck kommen, der bei bestimmten Frequenzen Maxima und Minima aufweist (Ronniger 1954, Kenner 1959). Die Herzaktion ist dann auf die Eigenschaften des Arteriensystems optimal abgestimmt, wenn die Pumpfrequenz einem Minimum des Eingangswiderstandes entspricht (Kenner 1959). Dieses Verhalten konnte beim Menschen und bei verschiedenen Tieren tatsächlich nachgewiesen werden (Kenner 1962).

Einer Beurteilung der Abstimmung auf Grund einfacher Kriterien liegt immer das beschriebene Verhältnis zwischen Herzfrequenz und Eingangswiderstand des Arteriensystems zugrunde. Von besonderer Bedeutung erscheint uns die von *Broemser* verwendete Beziehung zwischen Systolendauer und Grundschwingungsdauer, die in dieser Untersuchung ausführlich diskutiert werden soll.

1. Theorie

Zur Darstellung der Grundzüge der Abstimmungstheorie ist es vorteilhaft, die Pulsationsvorgänge im einfachen homogenen Schlauchmodell zu betrachten. Die vom Herzen erzeugte Druckwelle läuft mit der Geschwindigkeit c über die Länge l des Schlauches ab, wird an dessen peripherem Ende reflektiert und trifft mit der zeitlichen Verspätung

$$[1] \quad T' = \frac{2l}{c}$$

wieder am Eingang, d. h. an der Aortenklappe, ein (*Frank* 1926, *Ronniger* 1954, *Wetterer* 1956, *Kenner* und *Ronniger* 1960). Die Grundschwingungsdauer T' (*Frank*) entspricht demnach der doppelten Laufzeit der Pulswelle über die gesamte Schlauchlänge.

Da das Herz einen in der Grundform dreieckförmigen Strompuls erzeugt, ist auch die Gestalt der primären Druckwelle dreieckförmig. Die Amplitude der reflektierten Welle ist entsprechend dem Reflexionsfaktor k kleiner als jene der primären. Da das Herz bzw. die geschlossene Aortenklappe für rückläufige Wellen einen praktisch unendlich hohen Strömungswiderstand darstellt, werden diese am Eingang der Aorta total reflektiert. Die Welle läuft nun mit unveränderter Amplitude wieder nach peripher, wobei sich der gleiche Vorgang wie bei der primären Welle wiederholt. Durch Abschwächung der Welle bei jeder Reflexion am peripheren Widerstand klingen die Druckschwankungen im Schlauch allmählich ab.

In Abb. 1a und 1b sind nach der geschilderten Methode von *D'Alembert* (vgl. *Kenner* und *Ronniger* 1960) für das Modell des einfachen homogenen Schlauchs konstruierte zentrale Druckpulse für verschiedene Verhältnisse S/T' (S -Systolendauer) sowie abhängig vom peripheren Reflexionsfaktor k gezeigt.

Die durch Reflexion entstandene rückläufige Welle stellt für das Herz, sofern sie noch während der Systole an der Aortenwurzel eintrifft, eine „Gegenpulsation“ dar. Als Maß für die Wirksamkeit dieser Gegenpulsation kann der von *Wetterer* (1940) eingeführte Quotient q der endsystolischen zur systolischen Druckamplitude angesehen werden. Innerhalb gewisser Grenzen gilt die Regel, daß dieser Quotient um so größer ist, je kürzer die Grundschwingungsdauer im Vergleich zur Systolendauer ist. Unter sonst gleichbleibenden Bedingungen ist außerdem q um so größer, je höher der periphere Widerstand und damit der Reflexionsfaktor k ist. Diese Zusammenhänge sind in Abb. 2 nach den Modellpulsen der Abb. 1 dargestellt. q wächst zunächst mit steigenden Werten des Verhältnisses S/T' , erreicht ein Maximum und nimmt schließlich wieder ab. Diese Abnahme

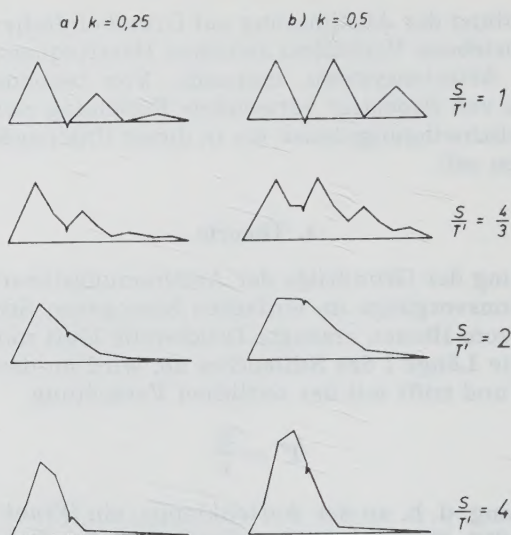


Abb. 1. Nach der Methode von d'Alembert für das homogene Schlauchmodell konstruierte zentrale Druckpulse. Für alle Pulse wurde ein symmetrisch-dreieckförmiger Primärpuls angenommen; die Systole ist in allen Kurven gleich lang, ihr Ende ist durch die Markierung einer Klappenschluß-Inzisur angedeutet. Von oben nach unten wurden verschiedene Werte für das Verhältnis S/T' (Systolendauer zu Grundschwingungsdauer) gewählt. Mit zunehmender Verkürzung der Grundschwingungsdauer T' (z. B. infolge Erhöhung der Pulswellengeschwindigkeit) steigt zunächst der endsystolische Druck an. Die Pulsform wird jenem von Alterspulsen bzw. Pulsen bei Arteriosklerose ähnlich. Für den peripheren Reflexionsfaktor k wurde in der linken Reihe (a) ein Wert von 0,25, in der rechten Reihe (b) ein Wert von 0,5 gewählt. Je größer der Reflexionsfaktor, desto höher ist auch der endsystolische Druck unter sonst gleichen Bedingungen.

ist dadurch bedingt, daß durch die Verkürzung der Grundschwingungsdauer die aufeinanderfolgenden Reflexionen in der Systole zusammengedrängt erscheinen, so daß der systolische Druck, wie in Abb. 1 deutlich zu erkennen ist, stark überhöht wird. Bei gleichbleibenden Werten des Verhältnisses S/T' wächst der Quotient q mit zunehmendem peripheren Reflexionsfaktor k .

Aus den Konstruktionen der Abb. 1 und 2 ist ohne weiteres ersichtlich, daß es für die Aktion einer an den homogenen Schlauch angeschlossenen Pumpe „günstig“ wäre, wenn die Systolendauer S so auf die durch die Grundschwingungsdauer T' zum Ausdruck kommende Eigenschaft des Schlauchs abgestimmt ist, daß das Verhältnis S/T' gleich 1 oder kleiner

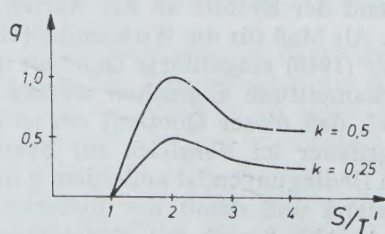


Abb. 2. Aus den Pulscurven der Abb. 1 gemessene Abhängigkeit des Quotienten q (endsystolische Druckamplitude/systolische Druckamplitude) für $k = 0,25$ und $k = 0,5$ vom Verhältnis S/T' . Näheres s. Text.

als 1 ist. In diesem Bereich wäre an dem Modell, zumindest für nicht periodisch erfolgende Einzelpulsationen, die notwendige Pumparbeit unabhängig von der Höhe des peripheren Reflexionsfaktors, da keine Gegenpulsationen im Zeitraum der Systole auftreten. Dies ist in Abb. 2 daran zu erkennen, daß der Quotient q zwischen $S/T' = 0$ und $S/T' = 1$ Null ist.

Der Einfluß der Periodizität der Pulsationen ist um so geringer, je kleiner der periphere Reflexionsfaktor k ist, da dann während jeder neuen Diastole die Schwingungen in dem Schlauch weitgehend abklingen können.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich, daß eine optimale Abstimmung in bestimmten zeitlichen Relationen zum Ausdruck kommen muß. Aus den bereits anfangs erwähnten Untersuchungen über das Verhalten des Eingangswiderstandes ist zu folgern, daß eine bestimmte Periodendauer T als „optimal“ anzusehen ist. Aus den hier dargestellten Konstruktionen kann man schließen, daß außerdem eine bestimmte Systolendauer S als „optimal“ bezeichnet werden kann. Die für die Abstimmung wichtigste Eigenschaft des Schlauchs kommt in der Zeitdauer T' der Grundschwingung zum Ausdruck. Über den peripheren Reflexionsfaktor kann nur ausgesagt werden, daß er möglichst klein sein soll.

Die Auswirkung der Abstimmung hängt von den Eigenschaften der Pumpe ab. Im Gegensatz zu der bei den Modellversuchen von Broemser verwendeten Pumpe ist das Herz sehr „hart“; sein Schlagvolumen ist daher weitgehend unabhängig von der Größe des arteriellen Eingangswiderstandes und wird durch systolische Gegenpulsationen, sofern sie im Größenbereich der Druckschwankungen reflektierter Wellen bleiben, kaum beeinflußt (Reichel und Kapal 1939, Kivull u. Mitarb. 1964, Ross u. Mitarb. 1966). Wenn Broemser's Resultate in vivo nicht unmittelbar verifiziert werden können, so liegt das nicht am Fehlen einer Abstimmung, sondern an der erwähnten Eigenschaft des Herzens. In vivo betrifft die Auswirkung der Abstimmung nicht so sehr die Größe des Schlagvolumens, sondern die zu dessen Förderung nötige Herzleistung.

Da das Arteriensystem kein einfacher homogener Schlauch mit Endwiderstand, sondern ein zusammengesetztes, verzweigtes Schlauchsystem ist, können die theoretisch abgeleiteten Beziehungen nicht buchstäblich darauf angewendet werden. Durch multiple Wellenreflexionen im Verlauf der Aorta, an Verzweigungsstellen und an den Enden der Seitenäste wird eine Abrundung der natürlichen Pulsformen gegenüber den in Abb. 1 gezeigten bewirkt. Zwar ist beim Menschen die arterielle Grundschwingung, übereinstimmend mit dem einfachen Modell, durch die am weitesten vom Herzen entfernten Reflexionsstellen in den Arterienverzweigungen des Fußes bedingt (Kapal u. Mitarb. 1961), so daß grundsätzlich Gl. [1] auch für die Deutung dieser Erscheinung in vivo gilt; jedoch ist wegen der zahlreichen Neben- und Zwischenreflexionen, die den systolischen Druckverlauf und damit auch den endsystolischen Druckwert beeinflussen, keine vollständige Übereinstimmung mit dem einfachen Modell gegeben. Dies betrifft vor allem die Beziehung zwischen dem Quotienten q , der Systolendauer, der Grundschwingungsdauer und dem peripheren Reflexionsfaktor.

Zur Klärung der Frage, inwieweit die für das einfache homogene Schlauchmodell dargestellte Theorie auf das Arteriensystem angewandt werden kann, wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt.

2. Experimentelle Untersuchungen

a) Versuche an Kaninchen

Zur Prüfung der Abhängigkeit des Quotienten q vom Verhältnis S/T' und vom peripheren Reflexionsfaktor k in vivo wurden Versuchsergebnisse, über die zum Teil bereits berichtet wurde (Kenner 1962), neu ausgewertet. Arterielle Druckpulse der Aorta asc. und der A. femoralis wurden an Kaninchen in Urethannarkose mittels Schwarzer-Manometer registriert. Aus den zentralen Druckkurven wurden der Quotient q sowie die Systolendauer S gemessen. Die Grundswingungsdauer T' wurde indirekt aus der mittels Fourier-Analyse der zentralen und peripheren Pulse ermittelten Resonanzfrequenz des Arteriensystems bestimmt. Der periphere Reflexionsfaktor k wurde aus den Ortskurven der Druckumformung gemessen.

Die Resultate sind in Abb. 3 und 4 dargestellt. In beiden Abbildungen bedeuten die Kreise Werte, die am unbeeinflussten Kreislauf erhalten wurden. Die Sternchen stellen Werte dar, die an denselben Tieren nach Drucksenkung durch intravenöse Injektionen von 2 bis 5 μg Acetylcholin gewonnen wurden.

Die Werte des Quotienten S/T' liegen zwischen 0,5 und 1,4. Die Normalwerte sind höher als beim Menschen (s. weiter unten). Auch die Normalwerte des peripheren Reflexionsfaktors sind höher als jene von normalen

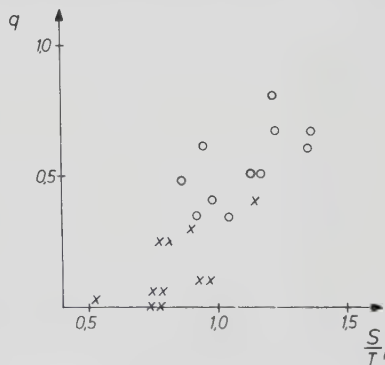


Abb. 3. Abhängigkeit des Quotienten q vom Verhältnis S/T' bei Druckpulsen von 11 Kaninchen in Urethannarkose. Kreise: Normalwerte; Sternchen: Werte nach i. v. Injektion von 2–5 μg Acetylcholin.

menschlichen Versuchspersonen, wo sie etwa 0,3 betragen (Ronniger 1954). Beides ist möglicherweise auf die Wirkung der Narkose zurückzuführen, was jedoch die grundsätzliche Aussage der Resultate nicht beeinflusst.

Der Verlauf der in Abb. 3 gezeigten Abhängigkeit des Quotienten q vom Verhältnis S/T' stimmt mit dem am homogenen Schlauchmodell gewonnenen im wesentlichen überein. Die wichtigste Abweichung von den konstruierten Kurven der Abb. 2 besteht darin, daß q bereits bei $S/T' = 1$ und darunter höhere Werte besitzt. Wenn man berücksichtigt, daß bei den hier ausgewerteten Versuchen die Werte von S/T' auffallend groß sind, muß man in vivo im allgemeinen mit einer noch deutlicheren Abweichung vom homogenen Schlauchmodell rechnen. Diese Verlagerung der Kurve ist

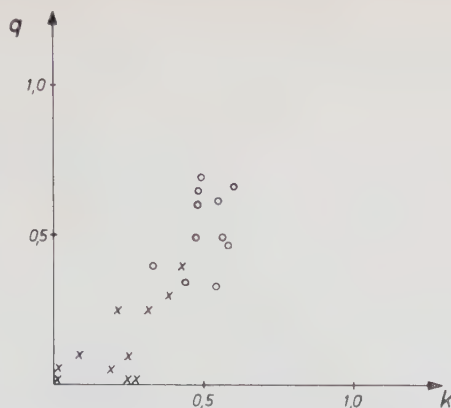


Abb. 4. Abhängigkeit des Quotienten q vom peripheren Reflexionsfaktor k bei Druckpulsen von 11 Kaninchen in Urethannarkose. Kreise: Normalwerte, Sternchen: Werte nach i.v. Injektion von 2-5 μg Acetylcholin.

offenbar durch den Einfluß der im theoretischen Teil diskutierten Nebenreflexionen bedingt, die eine Erhöhung des endsystolischen Drucks bereits vor Eintreffen der Hauptreflexionen bewirken. Wenn trotz dieser „Störung“ durch Nebenreflexionen die Form der Abhängigkeit gewahrt bleibt, so spricht dies dafür, daß die im theoretischen Teil besprochenen Folgerungen auch unter Berücksichtigung multipler Reflexionen ihre Berechtigung behalten. Obschon für die Abstimmung im Einzelfall die quantitativen Beziehungen der verschiedenen Größen eine wesentliche Rolle spielen, so ist doch für den Nachweis der Existenz einer Abstimmung schon allein die gefundene Übereinstimmung der funktionellen Abhängigkeit ausschlaggebend.

Das in Abb. 2 gezeigte Maximum und der absteigende Teil der Kurve wird bei den in Abb. 3 dargestellten Ergebnissen nicht erreicht. Es kann daher auch nichts darüber ausgesagt werden, ob der weitere Verlauf der Abhängigkeit bei Vergrößerung von S/T' der einfachen Theorie folgt.

Für die gleichen Versuche ist die Abhängigkeit des Quotienten q vom peripheren Reflexionsfaktor in Abb. 4 dargestellt und zeigt eine gute Übereinstimmung mit der einfachen Theorie.

b) Aus menschlichen Sphygmogrammen gewonnene Ergebnisse

Die Abhängigkeit des Quotienten q von der Systolendauer bei Konstanz der Grundschwingungsdauer kann am einfachsten bei Patienten mit absoluter Arrhythmie infolge Vorhofflimmerns untersucht werden. Wir haben im ganzen 8 Sphygmogramme der A. carotis ausgewertet, die mit Pulsabnehmern nach Boucke-Brecht registriert und uns freundlicherweise von Herrn Dr. E. Lang, Medizinische Poliklinik der Universität Erlangen-Nürnberg, zur Verfügung gestellt worden waren. Von jeweils 20 Pulszyklen wurden die Quotienten q sowie die Systolendauern und die Korrelation berechnet (Linder 1957). Für die Korrelationskoeffizienten ergaben sich Werte zwischen 0,65 und 0,98; die Abhängigkeit ist daher bei allen 8 Fällen signifikant ($p < 0,01$).

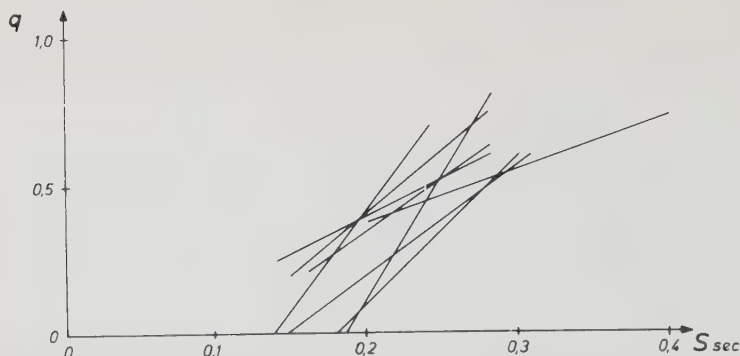


Abb. 5. Regressionsgeraden der Abhängigkeit des Quotienten q von der Systolendauer, die durch Auswertung von Carotis-Sphygmogrammen von 8 Patienten mit Vorhofflimmern gemessen wurden. In allen 8 Fällen ist die Korrelation signifikant ($p < 0,01$). Man erkennt die in Abb. 2 theoretisch geforderte Abhängigkeit.

Abb. 5 zeigt die hierbei ermittelten Regressionsgeraden, die eine analoge Abhängigkeit des Quotienten q von der Systolendauer erkennen lassen wie bei den Kaninchenversuchen. Man kann voraussetzen, daß die Grundschwingungsdauer T' in jedem Einzelfall (abgesehen von geringen Variationen der Pulswellengeschwindigkeit infolge der arrhythmiebedingten Blutdruckschwankungen während des Zeitraums der ausgewerteten Pulsperioden) konstant bleibt, so daß Abb. 5 ebenfalls als Bestätigung der theoretisch geforderten Abhängigkeit des Quotienten q vom Verhältnis S/T' in vivo aufzufassen ist.

Die Abhängigkeit des Quotienten q vom peripheren Reflexionsfaktor wurde entsprechend den oben beschriebenen Kaninchenversuchen durch Analyse von 33 menschlichen Sphygmogrammen der A. carotis und der A. femoralis untersucht. Es handelte sich um männliche und weibliche Personen im Alter von 14 bis 80 Jahren mit hypotonen, normalen und hypertonen Blutdruckwerten, so daß die Auswertung einen relativ guten

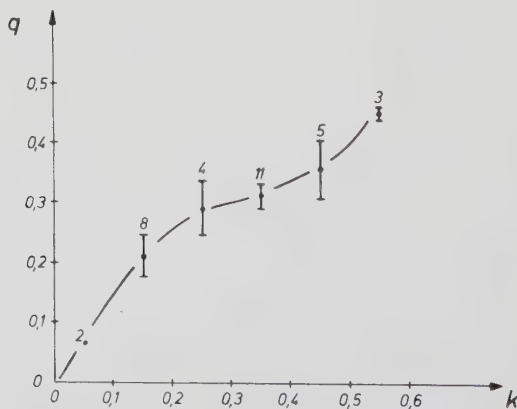


Abb. 6. Abhängigkeit des Quotienten q vom peripheren Reflexionsfaktor k aus Sphygmogrammen von 33 Patienten berechnet. Die q -Werte wurden in Gruppen eingeteilt. Es sind die Mittelwerte mit den dazugehörigen Streuungen eingezeichnet. Die Ziffern geben die jeweilige Zahl der Meßwerte an. Die Gesamt-Korrelation ist signifikant ($r = 0,51$, $p < 0,01$).

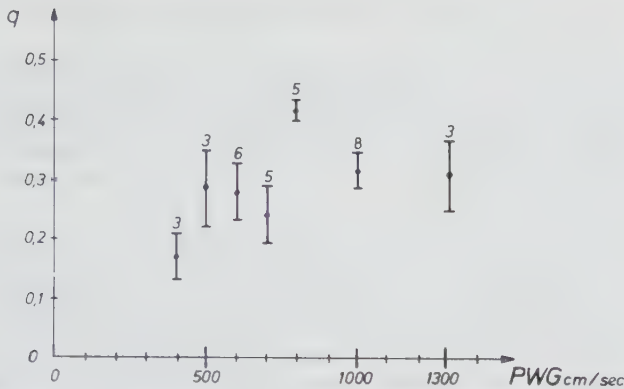


Abb. 7. Abhängigkeit des Quotienten q von der Pulswellengeschwindigkeit bei 33 Patienten. Die Streuung der Beziehung ist relativ groß. Der Verlauf der Abhängigkeit ist jedoch der theoretisch-konstruierten Abb. 2 ähnlich. Dies ist zu fordern, da bei annähernd gleichbleibender Systolendauer S der Quotient S/T' proportional der Pulswellengeschwindigkeit ist.

Überblick über die untersuchten Parameter bei verschiedenen Kreislaufzuständen gibt. Auch hier zeigt die Analyse das gleiche Ergebnis wie jene der Kaninchenpulse, allerdings, wie in Abb. 6 erkennbar ist, mit etwas größerer Streuung. Aus diesem Grund wurden die Werte in Gruppen aufgeteilt, für die jeweils Mittelwert und mittlerer Fehler des Mittelwertes berechnet wurden. Für alle 33 Wertepaare ergab sich ein Korrelationskoeffizient $r = 0,51$. Die Abhängigkeit ist demnach signifikant ($p < 0,01$). Die größere Streuung im Vergleich mit der an Kaninchen gefundenen Beziehung ist darauf zurückzuführen, daß bei dieser Versuchsreihe der Quotient q viel mehr von individuellen Unterschieden der Systolendauern und der Grundschwingungsdauern bei Personen verschiedenen Alters beeinflusst wird. Trotzdem ergibt das in Abb. 6 dargestellte Ergebnis eine Bestätigung der theoretisch geforderten Abhängigkeit des Quotienten q vom peripheren Reflexionsfaktor.

Der Quotient S/T' variierte in den untersuchten Sphygmogrammen zwischen 0,77 und 1,0 mit einer Häufung bei 0,85. Da die Grundschwingungsdauer T' auch im peripheren Puls mit zunehmendem Alter und vor allem mit anwachsender Pulswellengeschwindigkeit undeutlich wird und schließlich bei typischen Alterspulsen nicht mehr erkennbar ist, erschien es vorteilhafter, die Abhängigkeit des Quotienten q vom Verhältnis S/T' indirekt zu prüfen. Da nach Gl. [1] die Grundschwingungsdauer in reziprokem Verhältnis zur Pulswellengeschwindigkeit steht, wurde aus den 33 menschlichen Sphygmogrammen die Beziehung zwischen q und der auf der Strecke Karotis – Femoralis gemessenen Pulswellengeschwindigkeit gemessen. Hierbei ist allerdings vernachlässigt, daß sowohl die Systolendauer S als auch die Länge des Arteriensystems bei den verschiedenen Patienten variieren. Diese Faktoren bewirken, ähnlich wie schon oben besprochen wurde, die Streuung der in Abb. 7 dargestellten Ergebnisse. Grundsätzlich kann jedoch der Verlauf der Mittelwertkurve von Abb. 7 als übereinstimmend mit der einfachen Theorie (Abb. 2) und auch mit den bereits oben besprochenen Ergebnissen der Abb. 3 und Abb. 5 angesprochen werden.

3. Vergleichend-physiologische Betrachtung

Die bisher dargestellten Ergebnisse zeigten, daß zwischen den für die Beurteilung einer Abstimmung zwischen Herz und Arteriensystem wesentlichen Parametern q und S/T' in vivo eine analoge Beziehung besteht wie in dem einfachen homogenen Schlauchmodell. Diese Aussage bezieht sich allerdings nur auf die Existenz dieser Beziehung und nicht auf deren quantitative Einzelheiten.

Es muß daher einerseits der Schluß gezogen werden, daß eine exakte Aussage über die Wirksamkeit und „Güte“ der Abstimmung im Einzelfall mit den hier beschriebenen elementaren Mitteln allein nicht gewonnen werden kann. Andererseits ist aus der gezeigten Übereinstimmung der Ergebnisse am einfachen Modell, am Kaninchen und am Menschen zu folgern, daß eine Abstimmung zwischen Herz und Arteriensystem immer mit konstanten Beziehungen zwischen den Zeitmaßen S , T und T' einhergehen muß. Die Existenz dieser konstanten Beziehung bei Säugetieren verschiedener Größe soll nun besprochen werden.

Bei Säugetieren verschiedener Größe findet man zwischen zahlreichen Parametern, die Eigenschaften des Gefäßsystems bzw. des Herzens betreffen, charakteristische Beziehungen (vgl. *Sjöstrand* 1961, *Grauwiler* 1965). So ist beispielsweise unter „basalen“ Bedingungen das Schlagvolumen etwa dem Körpergewicht, das Minutenvolumen annähernd der Körperoberfläche proportional. Andererseits ist bei den verschiedenen Warmblütern unter normalen „basalen“ Ruhebedingungen der arterielle Blutdruck etwa gleich hoch. Auch der Wert der Pulswellengeschwindigkeit in der Aorta ist bei verschiedenen Warmblütern gleich (*Deppe* 1941).

Letzteres ist ohne weiteres verständlich, wenn man die *Moenssche* Gleichung

$$[2] \quad c = \sqrt{\frac{Eh}{2r\rho}}$$

betrachtet. Es ist zu erwarten, daß der Elastizitätsmodul E der Arterienwand bei verschiedenen Tieren etwa gleich groß ist, da der histologische Gewebebau kaum wesentliche Unterschiede aufweist. Auch die Dichte des Blutes ρ variiert praktisch nicht. Da auch das Verhältnis h/r von Wanddicke zu Gefäßradius in den Aorten verschiedener Tiere weitgehend gleich ist, ist nach Gl. [2] auch kein wesentlicher Unterschied der Pulswellengeschwindigkeit zu erwarten.

Sofern unter diesen Voraussetzungen eine konstante und im Sinne *Broemers* optimale Abstimmung zwischen der Herzaktion und dem Arteriensystem besteht, müssen zwischen der Pulsperiodendauer T , der Systolendauer S und der Grundschwingungsdauer T' konstante Relationen bei Tieren verschiedener Größe gefunden werden.

Von diesen Relationen ist die Konstanz des Quotienten S/T am bekanntesten und kann daher als gesichert angesehen werden (*Deppe* 1941). Die Konstanz des Verhältnisses S/T' ist experimentell schwieriger nachzuweisen. Mit Hilfe der Gl. [1] und Gl. [2] ist jedoch eine relativ einfache Überprüfung möglich. Wenn die mittlere Pulswellengeschwindigkeit bei verschiedenen Tieren gleich ist, muß die Grundschwingungsdauer nach Gl. [1] proportional der Länge l des Arteriensystems sein. Die Länge des

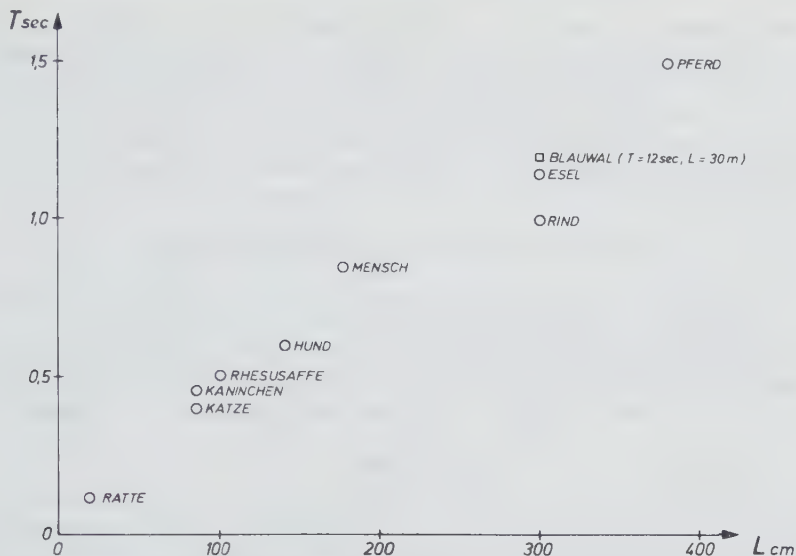


Abb. 8. Abhängigkeit der Pulsperiodendauer T von der Gesamt-Körperlänge L (Scheitel-Sohle, bzw. Schnauze-Fuß). Nach Angaben von Deppe (1941), und Grauwiler (1965). Nähere Erklärung im Text.

Arteriensystems muß ferner in weitgehend konstanter Relation zur Gesamtkörperlänge L stehen. Eine Konstanz des Verhältnisses S/T' bzw. T'/T' bei verschiedenen Tieren muß also in einer linearen Beziehung zwischen der Gesamtkörperlänge L (Scheitel-Sohle bzw. Schnauze-Fuß) und der Pulsperiodendauer T zum Ausdruck kommen.

Die Abhängigkeit der Pulsperiodendauer T von der Körperlänge L verschiedener Tiere ist in Abb. 8 nach Angaben von Deppe 1941 und Grauwiler 1965 dargestellt. Man erkennt tatsächlich, daß von sehr kleinen Tieren (Ratten) bis zu den größten warmblütigen Säugetieren (Blauwal) eine weitgehend lineare Beziehung zwischen Körperlänge und Pulsperiodendauer besteht.

Bei der Beurteilung dieser Abhängigkeit ist zu berücksichtigen, daß die Angaben in verschiedenen Publikationen variieren, da die Pulsfrequenz stark vom Zustand der Tiere während der Messung beeinflusst wird. Vor allem die Angaben bezüglich der Pulsfrequenz des Blauwals variieren sehr stark, da Messungen meist an gestrandeten Tieren durchgeführt werden. Wir haben daher in diesem Fall den niedrigsten Wert der mittels Ekg gemessenen Pulsfrequenz zur Berechnung der Periodendauer T herangezogen.

Auch wenn man alle möglichen Fehlerquellen und Ungenauigkeiten in Betracht zieht, scheint es uns gerechtfertigt, das in Abb. 8 dargestellte Ergebnis als Bestätigung der Existenz einer individuellen Abstimmung im Sinne Broemmers aufzufassen.

Als weiterer interessanter Gesichtspunkt sei auf die auffallende Ähnlichkeit der Pulsformen verschiedener Tiere und des Menschen hingewiesen. Abgesehen von den zeitlichen Unterschieden infolge der Verschiedenheit der Pulsfrequenz lassen sich arterielle Druckkurven verschiedener

Säugetiere weder hinsichtlich des Mitteldrucks, der Druckamplitude noch der Pulsform eindeutig unterscheiden (Wezler und Böger 1939). Es besteht also nicht nur eine Konstanz der Verhältnisse von T , S und T' , sondern eine viel weitergehende Konstanz der Beziehungen zwischen der Herzaktion und den Eigenschaften des Arteriensystems, die eben in der Übereinstimmung der Pulsformen trotz der beträchtlichen Unterschiede des Zeitablaufs der Pulsationen zum Ausdruck kommt.

4. Die Veränderung der Abstimmung im Alter

Die bisherige Darstellung bezog sich in erster Linie auf die normale Beziehung zwischen Herz und Arteriensystem beim Erwachsenen.

Über die Abstimmung während der foetalen Entwicklung und des kindlichen Wachstumsalters gibt es unseres Wissens bisher keine Befunde. Man kann zwar auch in diesen Perioden eine gleichzeitige Zunahme der Körperlänge und der Pulsperiodendauer beobachten, jedoch weicht die Beziehung dieser beiden Größen von der in Abb. 8 dargestellten Kurve ab, da der arterielle Druck und vermutlich auch die Pulswellengeschwindigkeit in frühen Entwicklungsstufen niedriger als bei Erwachsenen sind und daher zur Prüfung der Abstimmung kompliziertere Voraussetzungen gemacht werden müssen. Da dies mangels genauerer Befunde derzeit noch nicht möglich ist, soll hierauf nicht näher eingegangen werden.

Während des normalen Alterns und bei pathologischen Veränderungen des Arteriensystems führt die zunehmende Steifigkeit der Arterienwand zu einer Erhöhung der mittleren Pulswellengeschwindigkeit und damit zu einer Verkürzung der Grundschwingungsdauer T' . Unter diesen Umständen verändert sich die Grundform der arteriellen Druckpulse in dem Sinn, wie es in Abb. 1 von oben nach unten dargestellt wird. Auch hierbei sind die bereits diskutierten Unterschiede zwischen dem Arteriensystem und dem einfachen homogenen Schlauchmodell zu berücksichtigen, wobei allerdings zu bemerken ist, daß diese Unterschiede mit zunehmender Versteifung der Arterienwände immer weniger ins Gewicht fallen. Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, wird die Pulskurve immer einförmiger. In den diastolischen Pulsteilen verschwinden die sekundären Erhebungen. Durch die zunehmende Erhöhung der Pulswellengeschwindigkeit wird das Arteriensystem einem weniger weitbaren und „punktförmigen“ Windkessel ähnlicher. Daher werden auch die Pulsformen jenen ähnlich, die in einem einfachen Windkesselmodell zu beobachten sind (vgl. Gadermann und Jungmann 1964).

Man darf wohl diese Veränderungen, die zunächst zu einer Erhöhung des Quotienten q und schließlich zu einer Zunahme der Pulsdruckamplitude führen, als Ausdruck einer „Verschlechterung“ der normalen Abstimmung deuten.

Eine solche Deutung legt die Frage nach der Regulation der Abstimmung nahe. Ohne Zweifel muß diese während der Foetalzeit, im Wachstumsalter und im endgültig beim Erwachsenen erreichten Zustand auf irgendeine Weise bewirkt und erhalten werden. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen scheint hierbei jedoch ein Regelmechanismus im engeren Sinn keine Rolle zu spielen. Zwar verändern sich bei kurzfristigen Kreislaufumstellungen (z. B. Injektion von Acetylcholin, Arbeit) alle wichtigen

Kreislaufparameter meist in der Weise, daß die zur Abstimmung erforderlichen Relationen erhalten werden; hierauf hat bereits *Kenner* (1962) hingewiesen. Jedoch kann beispielsweise die gleichzeitige Erniedrigung der Pulsfrequenz, des Blutdrucks und der Pulswellengeschwindigkeit durch die Wirkung von Acetylcholin, wodurch der Quotient T/T' ungefähr konstant gehalten wird, nicht als Ausdruck eines aktiv wirksamen Regulationsvorganges aufgefaßt werden.

Die Entstehung und Erhaltung der Abstimmung scheint daher auf ähnliche Weise genetisch festgelegt zu sein wie etwa die Entwicklung der Körperproportionen.

Gegen eine eigentliche Regelung der Abstimmung im einzelnen Individuum spricht auch die Tatsache, daß bei langfristigen Veränderungen der Kreislaufparameter im Altersprozeß keine Erhaltung der optimalen Abstimmung zu beobachten ist.

5. Diskussion

Die vorliegende Untersuchung hat den Zweck, die Voraussetzungen und die Bedeutung einer Abstimmung zwischen Herz und Arteriensystem auf einfache Weise darzustellen. Der Begriff „Abstimmung“ wurde bereits eingangs im Sinne *Broemser's* definiert und beinhaltet die Annahme, daß in vivo zwischen der Herzaktion und dem Eingangswiderstand des Arteriensystems eine solche Relation besteht, daß die vom Herzen zur Förderung eines bestimmten Schlagvolumens nötige Energie unter Normalbedingungen den kleinstmöglichen Wert besitzt.

Die zur Aufrechterhaltung einer konstanten Strömung (Minutenvolumen) vom linken Ventrikel aufgewandte Leistung besteht aus zwei Anteilen, deren erster bei gegebenem arteriellem Mitteldruck einen bestimmten unveränderlichen Wert besitzt, während der zweite von der Höhe der Druck- und Strömungsamplituden am Eingang der Aorta und damit vom Verhalten des arteriellen Eingangswiderstandes abhängt (*Kenner* 1959). Die beiden Anteile bezeichnet man sinngemäß als Gleichstromleistung bzw. Wechselstromleistung. Die Wechselstromleistung einer kontinuierlich fördernden Gleichstrompumpe ist Null. Die Diskontinuität der Herzaktion erfordert eine Wechselstromleistung, die am linken Ventrikel etwa 10 bis 20% der Gleichstromleistung beträgt (*Kenner* 1959). Nur auf diesen relativ kleinen Leistungsanteil bezieht sich die Frage, ob das Herz seine Energieabgabe normalerweise durch eine möglichst „optimale“ Abstimmung seiner Aktion auf die Eigenschaften des Arteriensystems auf ein Minimum reduzieren kann.

Vom rein energetischen Standpunkt wäre für den Kreislauf eine Gleichstrompumpe, deren Wechselstromleistung den überhaupt kleinsten Wert, d. h. Null besitzt, „optimal“. Eine Reduktion der Wechselstromleistung des Herzens auf beliebig kleine Werte wäre theoretisch auch durch Ersetzen des Arteriensystems durch einen Windkessel großer Weitebarkeit möglich.

Die Tatsache, daß die Abstimmung nur relativ kleine Energiebeträge einzusparen vermag und die offensichtliche Unmöglichkeit, die beiden zuletzt erwähnten Mechanismen einer Abstimmung in vivo zu realisieren, zeigen, daß die „Optimierung“ der Herzleistung in Wirklichkeit viel kom-

plizierter ist, als es hier dargestellt werden konnte. Die Abstimmung zeitlicher Relationen der Herzaktion auf die Eigenschaften des Arteriensystems kann nur als ein kleiner und möglicherweise untergeordneter Teil einer viel allgemeineren „Optimierung“ der Herz- und Kreislauffunktionen aufgefaßt werden.

Unsere Darstellung geht von dem Ablauf der Pulsationen und Eigenschwingungsvorgänge im einfachen homogenen Schlauchmodell aus, da sich an diesem Modell die frequenzmäßige Abstimmung der Herzpumpe am einfachsten und klarsten demonstrieren läßt. Die Wirkung der Nichtlinearität, der Inhomogenität und der Verzweigungen des Arteriensystems in vivo haben offensichtlich auf die zeitlichen Relationen der Abstimmung kaum einen Einfluß. Die durch diese Faktoren bewirkte, von *Taylor* (1965) sowie *Kenner* und *Wetterer* (1966) diskutierte Anpassung von Eingangs- und Abflußwiderstand im Arteriensystem ist deswegen von Bedeutung, weil hierdurch die Auswirkung von Abweichungen der frequenzmäßigen Abstimmung und von raschen Veränderungen des peripheren Widerstandes auf die Herzleistung reduziert wird.

Auf solche Fragen, die einen weiteren Beitrag des Arteriensystems zu der erwähnten „Optimierung“ beinhalten, soll hier nicht näher eingegangen werden. In diesem Zusammenhang sei nur noch auf den Einfluß der Arbeitsweise des Herzens hingewiesen, die offenbar neben den hier erwähnten Mechanismen zu einer „Optimierung“ des Minutenvolumens unter Normalbedingungen beiträgt (vgl. *P. Päuser* und *Kenner*).

In letzter Zeit haben *Gadermann* u. Mitarb. (1961, 1964) sowie *Millahn* u. Mitarb. (1962, 1966) beobachtet, daß unter verschiedenen Bedingungen das Verhältnis T/T' im Arteriensystem statistische Häufigkeitsmaxima bei den ganzen Zahlen 2 und 3 aufweist. Die Autoren nahmen an, daß dieser Befund eine Abstimmung zwischen Herz und Arteriensystem ausdrückt.

Im Zusammenhang mit der hier dargestellten Auffassung kann die Beobachtung von *Gadermann* u. Mitarb. insofern als Beweis für die Existenz einer Abstimmung aufgefaßt werden, als hiermit neben den bereits diskutierten eine weitere konstante Relation zwischen verschiedenen Kreislaufgrößen nachgewiesen werden konnte. Wenn auch Werte des Quotienten T/T' von 2/1 bis 3/1 als Ausdruck einer optimalen Abstimmung gedeutet werden können, da in diesem Bereich die Pulsfrequenz weitgehend einem Minimum des arteriellen Eingangswiderstandes entspricht (*Kenner* 1962), kann auf Grund unseres bisherigen Wissens die von den oben erwähnten Autoren beobachtete Häufung ganzzahliger Werte des Quotienten T/T' nicht geklärt werden. Es ist möglich, daß die Prüfung der Abstimmung mittels inhomogener zusammengesetzter Modelle des Arteriensystems nähere Aussagen über die Ursache und Bedeutung der von *Gadermann* u. Mitarb. sowie *Millahn* u. Mitarb. beschriebenen Erscheinung gestattet.

Zusammenfassung

Broemser (1935) hat als erster die Annahme ausgesprochen, daß zwischen der Herzaktion und den Eigenschaften des Arteriensystems eine optimale Abstimmung besteht. Die zum Auswerfen eines bestimmten Schlagvolumens notwendige Herzarbeit hängt vom arteriellen Gegendruck während der Systole ab. Dieser wird einerseits durch den vom Herzen erzeugten Strömungsverlauf, andererseits

durch Eigenschaften des Arteriensystems (Dehnbarkeit, peripherer Widerstand, Wellenreflexionen) bestimmt, die in ihrem Zusammenwirken als der sogenannte arterielle Eingangswiderstand zum Ausdruck kommen. Als optimal abgestimmt kann die Herzaktion dann bezeichnet werden, wenn ihre Frequenz einem Minimum des Eingangswiderstandes entspricht.

Auf elementare Weise ist die Abstimmung mit Hilfe des einfachen homogenen Schlauchmodells erklärbar und besteht darin, daß Systolendauer und Grundschwingungsdauer in einer solchen gegenseitigen Relation stehen, daß während der Systole keine reflektierten Wellen als „Gegenpulsation“ am Aorteneingang eintreffen. Auf Grund von Messungen an arteriellen Pulsen von Kaninchen und von Menschen kann gezeigt werden, daß dieses modellgemäße Kriterium grundsätzlich auch auf das Arteriensystem in vivo angewandt werden kann. Es läßt sich ferner zeigen, daß bei Säugetieren verschiedener Größe konstante Relationen zwischen Systolendauer, Grundschwingungsdauer und Pulsperiodendauer bestehen, die als Ausdruck einer Abstimmung zwischen Herz und Arteriensystem im Sinne *Broemser's* aufzufassen sind.

Summary

Ph. Broemser was the first to suggest the existence of an optimal relation (matching) between the action of the heart and the physical properties of the arterial system. Proof for this assumption can be found on the one hand from comparative physiological data which show constant relations between certain hemodynamic parameters (duration of systole, overall length of the arterial tree, pulse wave velocity) in animals of different sizes under resting conditions. On the other hand, measurements of the relation between duration of systole and endsystolic pressure amplitude in patients with arrhythmia indicate that this optimal relation may be regulated in a given subject under conditions of varying cardiac output.

Literatur

- Broemser, Ph.*, Z. Biol. **96**, 1 (1935). – *Deppe, B.*, Z. Biol. **100**, 437 (1941). – *Frank, O.*, Z. Biol. **85**, 91 (1926). – *Gademmann, E.*, *G. Hildebrandt* und *H. Jungmann*, Z. Kreislaufforschg. **50**, 805 (1961). – *Gademmann, E.* und *H. Jungmann*, Klinische Arterienpulsschreibung (München 1964). – *Grawwiler, J.*, Herz und Kreislauf der Säugetiere (Basel-Stuttgart 1965). – *Kapal, E.*, *F. Martini*, *H. Reichel* und *E. Wetterer*, Z. Biol. **104**, 429 (1951). – *Kenner, Th.*, Z. Kreislaufforschg. **48**, 570 (1959); Z. Biol. **111**, 178 (1959); Z. Biol. **113**, 125 (1962). – *Kenner, Th.* und *R. Ronniger*, Arch. Kreislaufforschg. **32**, 141 (1960). – *Kenner, Th.* und *E. Wetterer*, Pflügers Arch. **291**, 19 (1966). – *Kiwull, P.*, *G. Ruedas*, *H. Reichel* und *A. Bleichert*, Pflügers Arch. **279**, 228 (1964). – *Linder, A.*, Statistische Methoden (Basel-Stuttgart 1957). – *Millahn, H. P.*, Z. Kreislaufforschg. **51**, 1155 (1962). – *Millahn, H. P.* und *P. Eckermann*, Z. Kreislaufforschg. **55**, 1047 (1966). – *Päuser, P.*, *Th. Kenner* und *K. Bachmann*, Z. Kreislaufforschg. **57**, 1049 (1968). – *Reichel, H.* und *E. Kapal*, Z. Biol. **99**, 581 (1939). – *Ronniger, R.*, Arch. Kreislaufforschg. **21**, 127 (1954). – *Ross, J.*, *J. W. Covell* und *E. H. Sonnenblick*, Circ. Research **18**, 149 (1966). – *Roth, O.*, Z. Biol. **96**, 541 (1935). – *Siedek, H.*, Z. Biol. **96**, 535 (1935). – *Sjöstrand, T.*, Forum cardiologicum **3**, 8 (1961). – *Taylor, M. G.*, Physics in Med. and Biol. **10**, 539 (1965). – *Wetterer, E.*, Z. Biol. **100**, 260 (1940); Verh. Dtsch. Ges. Kreislaufforschg. **22**, 26 (Darmstadt 1956). – *Wezler, K.* und *A. Böger*, Ergebn. Physiol. **41**, 291 (1939).

Anschrift der Verfasser:

Cand. med. *Heidrun Päuser* und Priv.-Doz. Dr. *Th. Kenner*, II. Physiolog. Institut der Universität Erlangen-Nürnberg, 852 Erlangen

Lebenslauf

Am 6. Oktober 1943 wurde ich in Schönebeck/Elbe als Tochter des Konsistorialrates Karl-Heinz van Alste und seiner Ehefrau Elisabeth, geb. Brückner, geboren. Ich habe vier Geschwister.

Nach meiner Grundschulausbildung von 1950 bis 1957 besuchte ich das Georg-Herwegh-Gymnasium in Berlin-Hermsdorf. Dort bestand ich am 3. März 1963 meine Reifeprüfung. Vom Sommersemester 1963 bis zum Wintersemester 1965/66 studierte ich an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Medizin. Am 4. Mai 1964 bestand ich dort mein Vorphysikum und am 2. November 1965 mein Physikum. Im Sommersemester 1966 studierte ich an der Universität Wien.

Am 6. August 1966 heiratete ich den Kandidaten der Medizin Peter Päuser in Flensburg.

Zum Wintersemester 1966/67 immatrikulierte ich mich wieder an der Universität Erlangen-Nürnberg, wo ich mich im Sommersemester 1968 zum Staatsexamen meldete, das ich am 13. Februar 1969 bestand.

Heidrun Päuser

